

УДК 621.382.2

Эффективность применения плоских и трапецевидных отражателей в нагревательных устройствах вакуумно-термических установок

Бычков С. П.^{1,*}, Жуков В. В.¹

^{*}bychkov@bmsturu

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье показаны результаты решения задачи определения эффективности использования плоских и трапецевидных отражателей в конструкции нагревательных модулей. Выведены расчетные зависимости для определения долей прямого и отраженного излучения, попадающего на заданную поверхность, соответственно, непосредственно от нагревателя и после отражения от поверхности рефлектора с учетом экранирования части отраженного излучения самим нагревателем.

Ключевые слова: нагрев излучением, нагревательные элементы, рефлектор, отражатель, вакуумно-термическое оборудование

Введение

В настоящее время в качестве нагревательных устройств вакуумно-термического оборудования широкое распространение получили нагревательные модули с применением галогенных ламп накаливания (ГЛН) [1]. Для повышения эффективности нагрева в составе таких модулей используют рефлекторы (отражатели), перенаправляющие лучистый поток, не попадающий на нагреваемую поверхность напрямую от нагревателя, в требуемую зону.

Данная постановка задачи соответствует проблематике создания эффективных излучателей в оптической области с целью обеспечения перераспределения светового потока для создания требуемого поля облученности в заданном направлении. Расчет эффективности осветительных приборов базируется на методах, разработанных основоположниками отечественной светотехнической школы (М.Л. Гуторов, М.А. Карякин, В.В. Мешков, В.В. Трембач, Р.Н. Фролов и др).

При переходе к рефлекторам для ИК-излучения принципиально важным отличием является изменение величины шероховатости поверхности рефлекторов, при которой

можно говорить о переходе от диффузного к зеркальному характеру отражения, и, что более важно, изменение акцента при расчете эффективности нагревательных модулей с отражателями. Если для световых приборов требуется обеспечение заданного профиля облученности, то есть упор делается на снижение неравномерности по световому полю, то для нагревательных модулей эффективность рефлектора целесообразно оценивать по увеличению интегрального теплового потока, отражаемого в заданном направлении. В вакууме теплопередача от нагревателей типа ГЛН осуществляется излучением, поэтому необходимо уметь рассчитывать потоки излучения от нагревателей непосредственно к изделию, которые и составляют полезную мощность нагревателей для практически имеющих место геометрических соотношений размеров нагревательных модулей, изделий и рабочей камеры и их поглотительных и излучательных свойств.

Постановка задачи определения эффективности отражателей при их использовании в составе нагревательных модулей и анализ подходов к ее решению были сделаны авторами [2], однако представленные ими расчетные модели основывались на частных упрощенных расчетных схемах. Цель настоящей работы – определение расчетных зависимостей для оценки эффективности использования произвольных зеркальных плоских и трапецевидных отражателей в составе нагревательных модулей с учетом экранирования излучения нагревательными элементами.

Использование полученных выражений позволяет быстро и достаточно точно рассчитывать геометрические параметры рефлекторов соответствующей формы при проектировании нагревательных модулей ИК-нагрева по критерию их максимальной эффективности.

Постановка задачи

Повышение эффективности излучательной системы с единичным источником возможно за счет применения рефлекторов (отражателей). В частности, для линейных источников (например, галогенных ламп типа КГТ) очень часто используют плоскую или трапецевидную форму отражателя [2].

Проведем сравнение эффективности плоского и трапецевидного отражателей для расчетной схемы излучения бесконечно длинного излучателя на бесконечную полосу конечной ширины, обладающую общей осью симметрии с отражателем.

Решение задачи для плоского рефлектора

Рассмотрим схему плоского рефлектора шириной $2l$, отражающего излучение бесконечно длинного источника на полосу шириной $2M$, расстояние между источником и рефлектором H , между источником и полосой h . Условная расчетная схема представлена на рисунке 1.

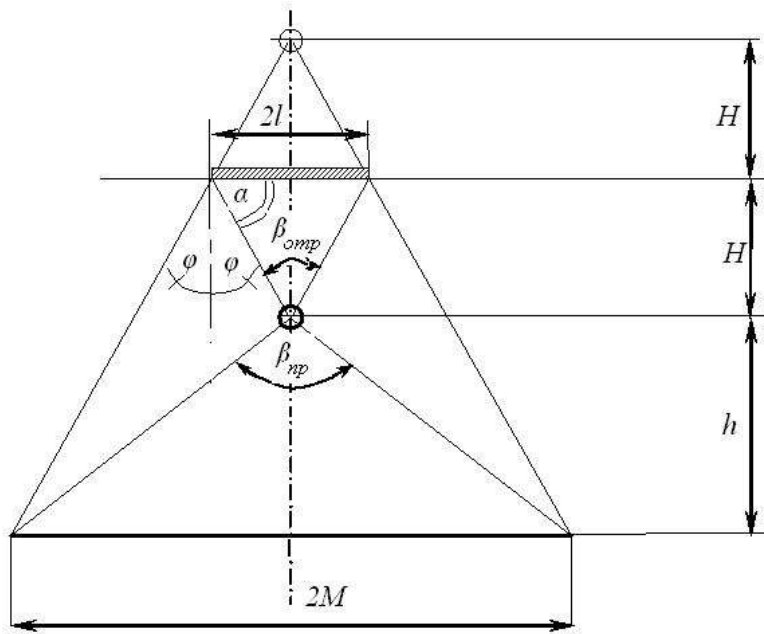


Рис. 1. Расчетная схема плоского отражателя

Для плоского отражателя эффективная ширина рефлектора $2l$, обеспечивающая зеркальное переотражение излучения нагревателя по всей ширине поверхности $2M$, в зависимости от этой ширины, расстояния от нагревателя до облучаемой поверхности h и расстояния от нагревателя до плоскости отражателя H определяется выражением

$$l = \frac{M \cdot H}{h + 2H}.$$

Угол захвата поверхности прямым излучением нагревателя β_{np} определяется из соотношения

$$\beta_{np} = 2 \arctg \frac{M}{h},$$

- угол захвата поверхности отраженным излучением нагревателя β_{omp} – из соотношения

$$\beta_{omp} = 2 \arctg \frac{l}{H} = 2 \arctg \frac{M}{h + 2H}.$$

Необходимо учесть экранирование отраженного излучения нагревателем или его оболочкой (например, стеклооболочкой ГЛН) в пределах угла $\beta_{экр}$ (Рисунок 2).

Из рисунка определяем величину

$$\beta_{экр} = 2 \arcsin \frac{d}{4H}.$$

Коэффициенты использования оценим через доли соответствующих углов захвата в суммарном угле излучения:

- для прямого излучения

$$\gamma_{изл}^{np} = \frac{\beta_{np}}{2\pi} = \frac{1}{\pi} \arctg \frac{M}{h};$$

-для отраженного излучения с учетом ослабления «мнимого» источника при коэффициенте отражения от поверхности рефлектора r_{omp} [3]

$$\gamma_{изл}^{omp} = \frac{r_{omp}}{2\pi} (\beta_{omp} - \beta_{экр}) = \frac{r_{omp}}{\pi} \left(\arctg \frac{l}{H} - \arcsin \frac{d}{4H} \right) = \frac{r_{omp}}{\pi} \left(\arctg \frac{M}{h+2H} - \arcsin \frac{d}{4H} \right),$$

$$\gamma_{изл}^{omp} = \frac{r_{omp}}{\pi} \left(\arctg \frac{M}{h+2H} - \arcsin \frac{d}{4H} \right).$$

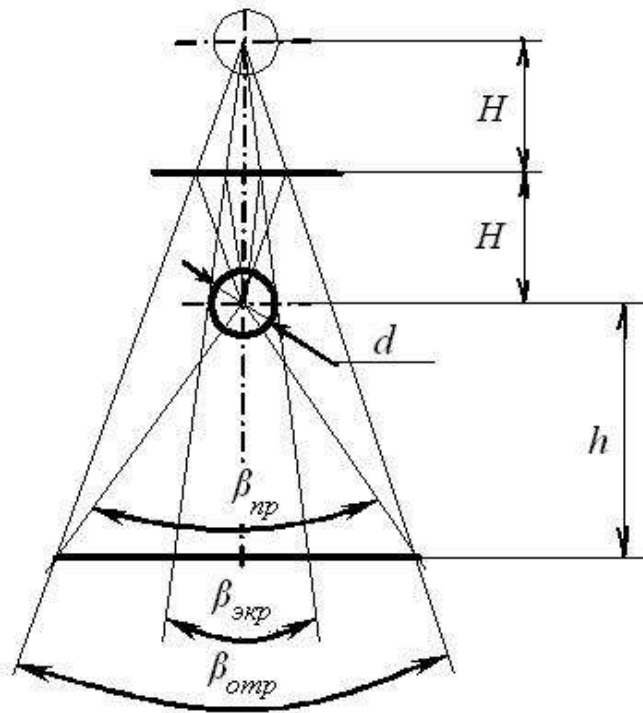


Рис. 2. Экранирование излучения нагревателем для плоского отражателя

Оценка суммарного коэффициента использования излучения имеет вид

$$\gamma_{изл} = \gamma_{изл}^{np} + \gamma_{изл}^{omp} = \frac{1}{\pi} \left(\arctg \frac{M}{h} + r_{omp} \left(\arctg \frac{l}{H} - \arcsin \frac{d}{4H} \right) \right).$$

После подстановки в это уравнение значения для l , получаем

$$\gamma_{изл} = \frac{1}{\pi} \left(\arctg \frac{M}{h} + r_{omp} \left(\arctg \frac{M}{h+2H} - \arcsin \frac{d}{4H} \right) \right).$$

Решение задачи для трапецевидного рефлектора

Расчетная схема аналогичной системы тел с трапецевидным профилем отражателя представлена на рисунке 3.

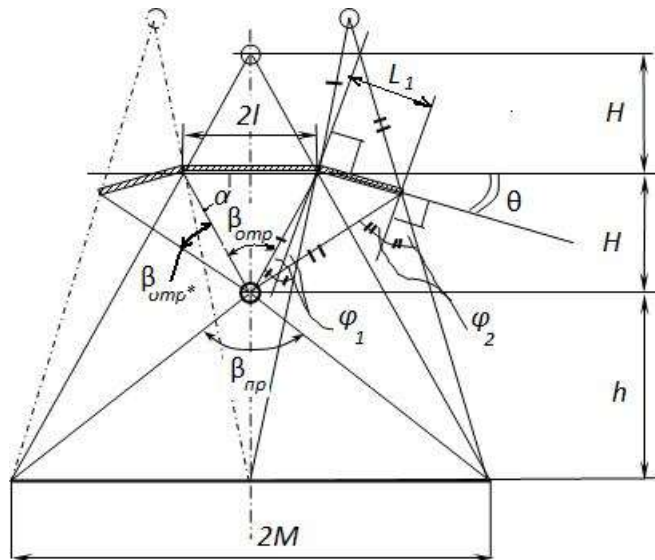


Рисунок 3. Расчетная схема трапецевидного отражателя

Боковые стороны (шириной L_1 каждая) рефлектора трапецевидного профиля, расположенные под углом θ к его центральной части шириной $2l$, отражают на облучаемую поверхность шириной $2M$ дополнительную часть потока. Требуется определить параметры l , θ и L_1 рефлектора при заданных значениях ширины облучаемой поверхности M и расстояний от источника до данной поверхности h и от источника до средней плоскости рефлектора H . При найденных L_1 и θ требуется оценить значение коэффициента использования излучения $\gamma_{изл}$.

Ширина средней части $2l$ находится как эффективная ширина плоского отражателя, обеспечивающая переотражение излучения от источника на нагреваемую поверхность:

$$l = \frac{M \cdot H}{h + 2H}.$$

Из вспомогательных величин важным является значение угла α , дополнительного к углу падения луча в крайних точках средней части отражателя. Его величина непосредственно зависит от l и равна

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{H}{l} = \operatorname{arctg} \frac{h + 2H}{M}.$$

Значение угла наклона θ боковых поверхностей отражателя к плоскости его средней части находим из условия переотражения в центр облучаемой поверхности луча, падающего под углом φ_1 в ближайшую к средней части отражателя точку его боковой поверхности:

$$\alpha + 2\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{h + H}{l} = \operatorname{arctg} \frac{(h + H)(h + 2H)}{M \cdot H};$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \varphi_1) = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}[(\alpha + 2\varphi_1) + \alpha].$$

В результате значение оптимального угла наклона θ равно

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \left[\operatorname{arctg} \frac{(h+H)(h+2H)}{M \cdot H} + \operatorname{arctg} \frac{h+2H}{M} \right].$$

Определение длины боковой части L_1 отражателя проводим исходя из условия попадания отраженного крайней точкой отражателя луча на край облучаемой поверхности. При этом луч падает на боковую часть поверхности под углом φ_2 к нормали к этой поверхности.

В качестве исходного соотношения для определения длины L_1 может быть взято, например, соотношение

$$L_1 \cdot \sin \theta + \frac{M - (l + L_1 \cdot \cos \theta)}{\operatorname{tg}(\varphi_2 - \theta)} = h + H.$$

Недостающее уравнение для неизвестного угла φ_2 выводим с помощью некоторых элементарных графических построений:

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg} \left[\frac{L_1}{H} \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \theta)} + \operatorname{ctg}(\alpha + \theta) \right].$$

Таким образом, мы имеем систему двух уравнений с двумя неизвестными, решая которую после некоторых элементарных преобразований получаем выражение для расчета оптимальной длины L_1 боковой части трапецевидного профиля:

$$L_1 = \frac{H \cdot (h + H) \cdot \left[1 + \left(\frac{m}{h + 2H} \right)^2 \right] \cdot \sin(2\theta)}{h \cdot \cos \theta - m \cdot \sin \theta};$$

$$L_1 = \frac{H \cdot (h + H) \cdot \left[1 + \left(\frac{M}{h + 2H} \right)^2 \right] \cdot \sin(2\theta)}{h \cdot \cos \theta - M \cdot \sin \theta}.$$

Данные соотношения получены для случая, когда отражение от каждой из боковых поверхностей рефлектора осуществляют в пределах соответствующей половины облучаемой поверхности, что позволяет несколько уменьшить неравномерность поля облученности.

Угол захвата поверхности прямым излучением нагревателя β_{np} определяется, как и в случае плоского отражателя, из соотношения

$$\beta_{np} = 2 \operatorname{arctg} \frac{M}{h}.$$

Угол захвата поверхности отраженным излучением состоит из двух составляющих:

-угол отражения от центральной плоской части рефлектора

$$\beta_{omp} = \pi - 2\alpha = 2 \operatorname{arctg} \frac{M}{h + 2H};$$

-угол отражения от двух боковых поверхностей рефлектора

$$\beta_{omp}^* = 2(\varphi_2 - \varphi_1),$$

где φ_1 определяется из соотношения

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \theta).$$

Суммарный угол захвата поверхности отраженным излучением равен

$$\beta_{omp}^{\Sigma} = \beta_{omp} + \beta_{omp}^* = (\pi - 2\alpha) + 2(\varphi_2 - \varphi_1) = 2(\varphi_2 + \theta).$$

Для угла φ_2 имеем по результатам решения выражение

$$\varphi_2 = \arctg \frac{\left[(h + 2H)^2 + \frac{M^2 \cdot h}{h + 2H} \right] \sin(2\theta) + 4M \cdot H \sin^2 \theta + 2M \cdot h}{2(h(h + 2H) \cos \theta - M \cdot H \sin(2\theta) - M^2 \sin^2 \theta)}.$$

После подстановки полученных соотношений для φ_1 и φ_2 в выражение для β_{omp}^{Σ} , получаем расчетное выражение:

$$\beta_{omp}^{\Sigma} = \pi + 2 \arctg \frac{\left[(h + 2H)^2 + \frac{M^2 \cdot h}{h + 2H} \right] \sin(2\theta) + 4M \cdot H \sin^2 \theta + 2M \cdot h}{2(h(h + 2H) \cos \theta - M \cdot H \sin(2\theta) - M^2 \sin^2 \theta)} - \arctg \frac{(h + H)(h + 2H)}{M \cdot H} - \arctg \frac{h + 2H}{M}.$$

Учитываем экранирование отраженного излучения нагревателем в пределах угла $\beta_{экр}$ (Рисунок 2), определяя его так же, как и для плоского отражателя:

$$\beta_{экр} = 2 \arcsin \frac{d}{4H}.$$

Теперь можем определить коэффициенты использования излучения через доли соответствующих углов захвата в суммарном угле излучения:

-для прямого излучения, как и для плоского отражателя, имеем

$$\gamma_{изл}^{np} = \frac{\beta_{np}}{2\pi} = \frac{1}{\pi} \arctg \frac{M}{h};$$

-для отраженного излучения с учетом ослабления «мнимого» источника при коэффициенте отражения от поверхности рефлектора r_{omp} и экранирования излучения -

$$\gamma_{изл}^{omp} = \frac{r_{omp}}{2\pi} (\beta_{omp}^{\Sigma} - \beta_{экр}).$$

После подстановки сюда выражений для β_{omp}^{Σ} и $\beta_{экр}$ получаем

$$\gamma_{изл}^{omp} = \frac{r_{omp}}{2} + \frac{r_{omp}}{\pi} \left(\arctg \frac{\left[(h + 2H)^2 + \frac{M^2 \cdot h}{h + 2H} \right] \sin(2\theta) + 4M \cdot H \sin^2 \theta + 2M \cdot h}{2(h(h + 2H) \cos \theta - M \cdot H \sin(2\theta) - M^2 \sin^2 \theta)} - \left(\frac{1}{2} \arctg \frac{(h + H)(h + 2H)}{M \cdot H} + \frac{1}{2} \arctg \frac{h + 2H}{M} + \arcsin \frac{d}{4H} \right) \right).$$

Оценка суммарного коэффициента использования излучения $\gamma_{изл}$ имеет вид

$$\gamma_{изл} = \gamma_{изл}^{np} + \gamma_{изл}^{omp}.$$

Заключение

Полученные соотношения для определения коэффициентов использования излучения для плоских и трапецевидных отражателей позволяют проводить приближенную оценку эффективности их использования в составе нагревательных модулей. Основным достоинством полученных зависимостей является их относительная простота.

Погрешность этой оценки связана с ограничениями, вносимыми используемыми расчетными моделями, а именно допущениями о бесконечной длине нагревательного элемента и изделия, однако при использовании в качестве нагревательных элементов длинных трубчатых галогеновых ламп накаливания получаемая оценка достаточно точна для задачи определения доли потока излучения лампы, попадающей на изделие, так как погрешность, вносимая неучетом конечной длины нагревателя и изделия, компенсируется многократным отражением потока излучения лампы от других поверхностей рабочей камеры, в результате чего часть этого потока также попадает на изделие. При необходимости учета конечных размеров нагревателей и изделия следует решать подобную задачу отдельно.

Полученные оценки коэффициентов использования излучения могут быть использованы при расчете лучистого теплообмена в замкнутых системах поверхностей с применением зеркальных отражателей.

Список литературы

1. Зворыкин Д.Б., Александрова А.Т., Байкальцев Б.П. Отражательные печи инфракрасного нагрева. М.: Машиностроение, 1985. 176 с.
2. Степаньянц Ю.Р., Федоров Б.С., Титов В.И. Расчет и проектирование высокоинтенсивных нагревательных устройств. Учебное пособие. М.: 1991. 140 с.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

Efficiency of Using Flat and Trapezoidal Reflectors in Vacuum and Thermal Equipment Heaters

S.P. Bychkov^{1,*}, V.V. Zhukov¹

^{*}bychkov@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: heat radiation, heating elements, heating devices, a reflector, the vacuum and thermal equipment

Heating modules using halogen glow lamps (HGL), as the heating elements, become a frequent practice in modern vacuum and thermal equipment. To raise the efficiency of such modules are used reflectors.

Since in vacuum the heat transfer from the GLN-heaters is provided through radiation, to have an effective operation of heating modules it is significantly important to determine the geometrical parameters of reflectors with the maximal thermal flux from the heater to a product, considering that both a direct radiation and a reflected one towards a product are used.

The article dwells on the task solution to define the optimum geometrical parameters of flat and trapezoidal reflectors with a specular reflection of radiation.

It presents the estimated efficiency of designed reflectors in the form of use factors of direct and reflected radiation taking into consideration the shielding proportion of radiation reflected by the heating element itself. These factors define correspondingly the proportions of direct and reflected radiation, coming from the heater to a product, in relation to the full radiation of the heater under consideration. The analysis of the reflected proportion of the radiant flux takes into account the effective properties of a surface. As a calculation model was used a radiation scheme of the thin long linear heater to a long strip of the final width. In the analysis of shielding was considered the influence of a lamp flask as a long cylinder with the specified diameter. The presented dependences allow us to calculate the optimum geometrical parameters of the relative positions in the system “heating element- reflector- heated surface”.

The formulas obtained are rather simple for use and allow us to estimate the useful component of a radiant flux from the heating module and its full power required to ensure desirable useful power when there is a geometrical reflection on a reflector surface.

References

1. Zvorykin D.B., Aleksandrova A.T., Baykal'tsev B.P. *Otrazhatel'nye pechi infrakrasnogo nagreva* [Infrared-heating reflective furnaces]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 176 p. (In Russian).
2. Stepan'yants Yu.R., Fedorov B.S., Titov V.I. *Raschet i projektirovanie vysokointensivnykh nagrevatel'nykh ustroystv* [Calculation and design of high-intensity heating devices]. Moscow, 1991. 140 p. (In Russian).
3. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 416 p. (In Russian).